

## **Pemodelan dan Simulasi *Weight Feeder Clinker* Di *Finish Mill Area II-41* PT. Semen Gresik (Persero), Tbk. [Suatu Studi Kasus]**

**Fendy Santoso**

Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Kristen Petra  
e-mail: fendy@petra.ac.id

### **Abstrak**

Pemodelan (*modelling*) berarti mengubah sistem dalam dunia nyata (*real world*) menjadi bentuk persamaan matematika. Modelling juga dapat diartikan sebagai usaha menirukan kelakuan proses "*real world system*" dalam usaha untuk memahaminya. Hal tersebut dilakukan dengan menyusun hubungan-hubungan fisik dari sistem sesungguhnya dengan menggunakan hukum-hukum ilmu alam (fisika dan / atau kimia). Tanggapan sistem dinamik dapat diperoleh, jika persamaan differensial tersebut dicari solusinya. Banyak metode untuk mencari solusi persamaan differensial sistem, misalnya dengan menggunakan metode Transformasi Laplace atau metode ruang keadaan (*state space*).

Makalah ini menjelaskan tentang pemodelan dan simulasi sistem fisik yaitu *weight feeder clinker* yang ada di *Finish Mill area II-41* PT. Semen Gresik (Persero), Tbk. Setelah model matematika tiap-tiap sub-sistem diturunkan, dilakukan penyusunan model sistem keseluruhan. Langkah selanjutnya adalah simulasi sistem dengan menggunakan program Simulink dari Matlab. Dari hasil simulasi diperoleh kesimpulan bahwa respon loop terbuka *weigh feeder* mempunyai kesalahan keadaan tunak (*error steady state*) yang besar. Karenanya diperlukan kerja controller otomatis untuk mengendalikan *plant* tersebut.

**Kata kunci** : Pemodelan, Transformasi Laplace, metode ruang keadaan .

### **Abstract**

*Modelling means changing real world systems into mathematical equations. Modelling also has the meaning as an action to repeat process behavior as an event to understand them. Those things can be done by making any physically relations from the real system by using any natural laws such as physics and / or chemistry. Dynamic system respon can be gotten if only that equation can be obtained by finding the solution of the differential equations. There are many methods to find the solution of system's differential equation, such as use Laplace Transform method or state space method.*

*This paper explains about modelling and simulation of a physical system: a weight feeder clinker at PT. Semen Gresik (persero), Tbk. After mathematical models every sub-systems can be obtained, the next step was to determine overall system's mathematical models. The next step was to simulate system performance by using software: Simulink from Matlab. From the simulation result, it was obtained conclusion that weight feeder's open loop response had great steady state error. Therefore an automatic controller was needed to control this plant.*

**Keywords** : Modeling, Laplace transform, state-space method.

### **Pendahuluan**

Langkah pertama dalam analisis sistem dinamik adalah menentukan model matematikanya. Penurunan model matematika adalah bagian yang penting dalam analisis sistem secara keseluruhan. Dinamika banyak sistem, baik itu sistem mekanik, elektrik, termal, kimia, dapat dijelaskan dalam bentuk persamaan differensial.

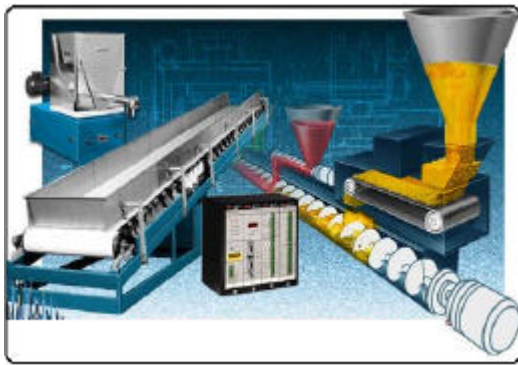
Persamaan differensial tersebut diperoleh dengan menerapkan hukum-hukum fisika yang berhubungan dengan sistem tersebut., misalnya Hukum Newton untuk sistem mekanika, Hukum Kirchhoff untuk sistem elektrik.

PT Semen Gresik (Persero),Tbk. merupakan Badan Usaha Milik Negara (BUMN) yang memproduksi semen dengan kapasitas 1,5 juta ton / tahun. Perkembangan PT. Semen Gresik (Persero), Tbk. dirintis pada jaman Belanda, ketika Ir. Van Es (1935-1938) menemukan batu kapur dalam jumlah besar di Gresik.

---

**Catatan** : Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 November 2002. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Elektro volume 3, nomor 1, Maret 2003.

Dalam industri persemenan, *weight feeder* memegang peranan yang penting dalam menentukan kualitas produk semen yang dihasilkan. Pada prinsipnya *weight feeder* dapat dianggap sebagai suatu timbangan elektromekanis yang secara otomatis menentukan banyaknya komponen penyusun yang akan diumpukan ke proses. Pada bagian pengolahan bahan mentah, *weight feeder* bertugas mencampur komponen penyusun semen seperti: batu kapur / *limestone* (80%), pasir silica (3%), pasir besi(1%) dan tanah liat / *clay* (16%), sebelum bahan-bahan itu diumpukan ke *kiln* dan *preheater* untuk proses pemanasan lanjut. Sedangkan pada bagian *finish mill*, *weight feeder* bertugas mencampur material setengah jadi (*clinker*) 80%, tras (17%) *gypsum* (3%), sebelum material tersebut digiling di *finish mill* (*tube mill*) [1].



Gambar 1 *Weight feeder*

## Representasi sistem

Ada dua metode pendekatan yang sering digunakan dalam pemodelan sistem:

- Pendekatan fungsi alih dalam kawasan frekuensi.
- Pendekatan ruang keadaan (*state space*) dalam kawasan waktu.

### 1. Pendekatan Fungsi Alih

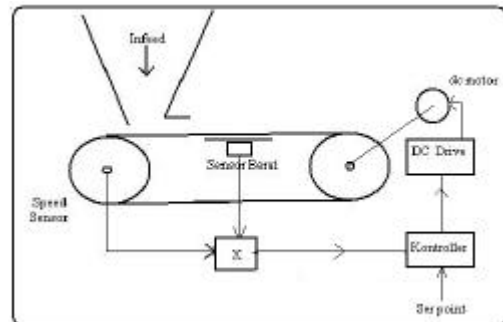
Fungsi alih sistem didefinisikan sebagai perbandingan transformasi Laplace keluaran terhadap transformasi Laplace masukan, dengan semua syarat awal nol. Fungsi alih sistem juga merupakan model matematika yang menghubungkan variabel masukan dengan variabel keluaran, namun ia sendiri tidak memberikan informasi mengenai struktur fisik sistem tersebut.

Jika pangkat tertinggi dalam  $s$  dalam fungsi alih adalah  $n$ , maka sistem disebut orde ke- $n$ . Kegunaan konsep fungsi alih terbatas pada

sistem linier, parameter sistem tidak berubah terhadap waktu (*time invariant*), sistem dengan satu masukan dan satu keluaran (single input-single output) [1].

### 2. Pendekatan Ruang Keadaan (*State Space*)

Keadaan (*state*) suatu sistem dinamis adalah suatu himpunan besaran fisis. Spesifikasi besaran-besaran tersebut secara lengkap menentukan perubahan yang terjadi dalam sistem. Besaran-besaran fisik spesifik yang menyatakan keadaan sistem tidak tunggal (*unique*), meskipun orde sistem tidak berubah.



Gambar 2 Gambar sistem loop tertutup pada *weight feeder clinker* [2].

### Model Matematika Sensor Kecepatan (*Speed Sensor*)

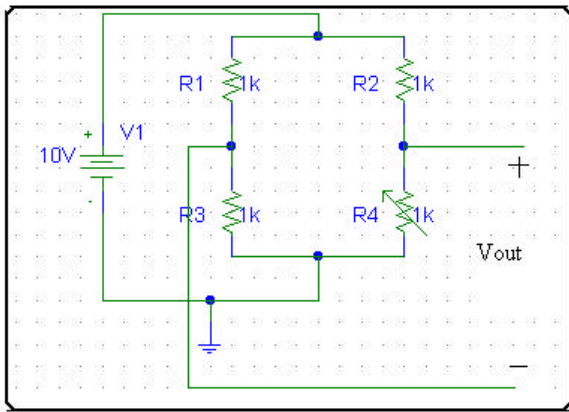
Sensor kecepatan pada *weight feeder*, berupa piranti elektronik yang menghasilkan frekuensi pulsa keluaran sebanding dengan besar kecepatan sudut poros motor. Secara umum model matematika sensor kecepatan dapat didekati dengan model sistem orde satu sebagai berikut:

$$\frac{K_s}{t_s s + 1} \quad (1)$$

Tetapi karena respon dinamik sensor jauh lebih cepat dibandingkan dengan respon proses, maka konstanta waktu (*time constant*) dan *death time* pada sensor dapat diabaikan. Sehingga fungsi alih sensor dapat didekati dengan penguatan (*gain*) saja. Besarnya gain sensor kecepatan  $K_s(s) = 1$ .

### Model Matematika Sensor Berat (*load cell*)

Sensor berat diletakkan tepat ditengah-tengah *belt conveyor*. Model matematika sensor berat dapat didekati dengan sistem orde satu. (seperti halnya sensor kecepatan).



Gambar 3. Rangkaian Sensor Berat (Load Cells) [3]

Tabel 1 Data fisik sensor berat

No.	Variabel	Nilai	Satuan
01.	Range input	0-91	Kg
02.	Range output	0-30	mV dc

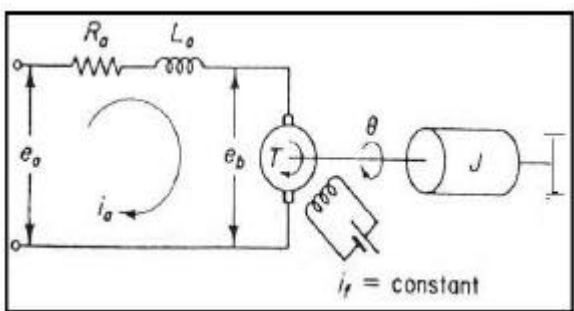
Seperti halnya sensor kecepatan, karena respon dinamik sensor jauh lebih cepat dibandingkan dengan respon proses, sehingga konstanta waktu (*time constan*) dan *death time* pada sensor dapat diabaikan, sehingga fungsi alih sensor dapat didekati dengan penguatan (gain saja). Pada akhirnya akan diperoleh perhitungan *gain* sebagai berikut:

$$\text{Gain} = \frac{\text{span\_output}}{\text{span\_input}}$$

$$\text{Gain} = \frac{30\text{mV}}{90,72\text{kg}} = 0,331\text{mv} / \text{kg} \cdot$$

Sehingga diperoleh besarnya gain sensor berat:  $K_w(s) = 0,331 \text{ mV/Kg}$ .

### Model Matematika Motor DC Berpenguat Terpisah



Gambar 4 Rangkaian motor dc berpenguat terpisah [4]

## 1. Besaran-Besaran Fisik Motor

- $R_a$  = tahanan jangkar ( $\Omega$ )
- $k_b$  = konstanta EMF balik
- $L_a$  = induktansi kumparan jangkar (H)
- $I_a$  = arus kumparan jangkar (A)
- $T_M$  = torsi motor (N.m)
- $T_D$  = Torsi gangguan (N.m)
- $I_f$  = arus medan (A)
- $J$  = momen inersia ekivalen ( $\text{kg-m}^2$ )
- $E_r$  = tegangan referensi masukan (Volt)
- $K_T$  = konstanta torsi
- $f$  = koefisien gesek viskos (Nm/rad/sec)
- $K_t$  = konstanta tachometer (volt/rad/sec)

## 2. Penurunan Model Matematika Motor dc

Tachometer dc memberikan tegangan keluaran  $e_t$  sebanding dengan kecepatan poros motor  $\omega$ . Tegangan ini dikurangkan dengan tegangan referensi input  $e_r$  menghasilkan signal error ( $e$ ). Sinyal ini sesudah dikuatkan digunakan untuk mengendalikan arus jangkar  $i_a$  dari motor dc.

Tachometer dc merupakan generator dc konvensional dengan eksitasi magnet permanent. Tegangan keluaran loop terbuka diberikan oleh persamaan :

$$e_t = K_t \omega \quad (2)$$

$\phi$  dibuat konstan (eksitasi magnet permanent), sehingga tegangan keluaran berbanding langsung dengan dengan kecepatan sudut  $\omega$ . Persamaan diatas dapat ditulis kembali :

$$e_t = k_t \omega \quad (3)$$

dimana  $k_t$  (volt/rad/sec) disebut sebagai konstanta tachometer. Tegangan pada terminal jangkar motor diberikan oleh persamaan :

$$e_a = K_a e = K_a (e_r - e_t) \quad (4)$$

Pada loop jangkar berlaku Hukum Kirchoff Tegangan :

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + K_b \omega = e_a \quad (5)$$

dimana  $K_b$  merupakan konstanta emf balik dari motor. Medan konstan, fluks konstan dan torsi mempunyai arah sesuai kumparan magnet, sehingga,

$$T_M = K_T i_a \quad (6)$$

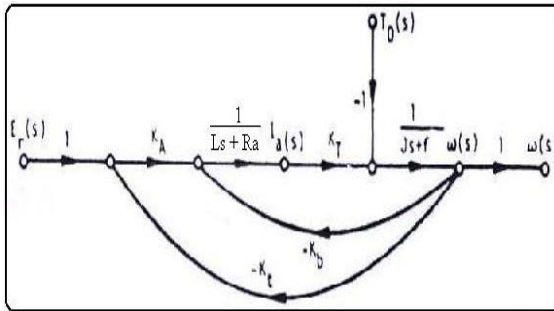
$K_T$  = konstanta torsi motor.

Arus Jangkar magnet menghasilkan torsi yang bekerja terhadap inersia dan gesekan, sesuai persamaan :

$$T_D + J \frac{d\mathbf{w}}{dt} + f\mathbf{w} = T_M = K_T i_a \quad (7)$$

Diasumsikan semua syarat awal adalah nol, kemudian diambil transformasi Laplace dari semua persamaan diatas:

$$\begin{aligned} E_t(s) &= K_t \mathbf{w}(s) \\ E_a(s) &= K_A [E_r(s) - E_t(s)] \\ L_a s I_a + R_a I_a(s) + K_b \mathbf{w}(s) &= E_a(s) \\ K_T I_a(s) = T_M(s) &= [Js + f] \mathbf{w}(s) + T_D(s) \\ T_m(s) - T_D(s) &= [Js + f] \mathbf{w}(s) \end{aligned} \quad (8)$$



Gambar 5. Grafik aliran signal pada motor dc berpenguat terpisah [4]

Berdasarkan penurunan rumus diatas dengan mengasumsikan torsi gangguan sama dengan nol, diperoleh:

- Hanya ada satu lintasan maju :
$$P_1 = \frac{K_A K_T}{(Ls + R_a)(Js + f)} \quad (9)$$

- Ada dua loop umpan balik :

$$P_{11} = \frac{-K_T K_b}{(Ls + R_a)(Js + f)}$$

- $$P_{21} = \frac{-K_A K_T K_t}{(Ls + R_a)(Js + f)} \quad (10)$$

- Tidak ada perkalian kombinasi dua, tiga, buah loop yang saling tidak menyentuh.
- Dengan menggunakan rumus Penguatan Masson (*Masson Gain Formula*):

$$T(s) = \frac{\mathbf{w}(s)}{E_r(s)} = \frac{\sum P_n \Delta_n}{\Delta}$$

$$\begin{aligned} \Delta &= 1 - \left[ \frac{K_T K_b}{(Ls + R_a)(Js + f)} - \frac{K_A K_T K_t}{(Ls + R_a)(Js + f)} \right] \\ &= 1 + \frac{K_T K_b + K_A K_T K_t}{(Ls + R_a)(Js + f)} \end{aligned}$$

Dengan melalui substitusi persamaan diatas, maka diperoleh rumus fungsi alih motor dc (tanpa pengabaian induktansi jangkar):

$$\begin{aligned} T(s) &= \frac{\mathbf{w}(s)}{E_r(s)} = \frac{\sum P_n \Delta_n}{\Delta} \\ &= \frac{K_A K_T}{(Ls + R_a)(Js + f) + K_T K_b + K_A K_T K_t} \\ &= \frac{K_A K_T}{LJ^2 s^2 + (Lf + R_a J)s + (R_a f + K_T K_b + K_A K_T K_t)} \\ &= \frac{\mathbf{w}_n^2}{s^2 + 2\zeta \mathbf{w}_n s + \mathbf{w}_n^2} \end{aligned} \quad (11)$$

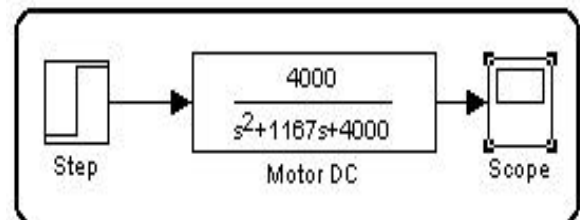
Motor dc yang digunakan adalah motor dc berpenguat terpisah dengan kontrol jangkar. Besarnya kecepatan diatur dengan mengubah-ubah besarnya tegangan jangkar.

Tabel 2 Data Fisik Motor dc

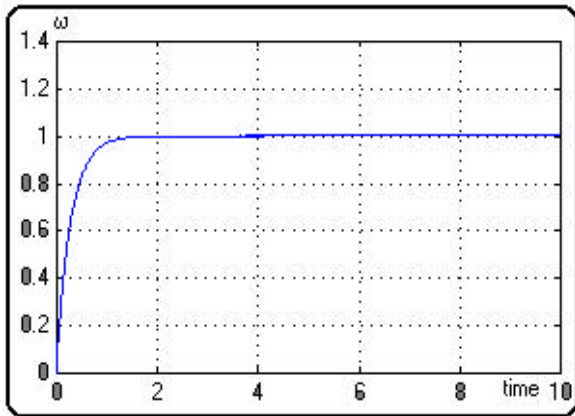
No	Besaran fisik	Harga	Sat.
01.	Daya	1,5	Hp
02.	Tahanan jangkar	5	Ohm
03.	Induktansi jangkar	3	Mh
04.	Konstanta torsi	$6 \cdot 10^{-5}$	Nm/A
05.	Konstanta emf balik	$0.055$	V/s.rad
06.	Momen Inersia	$5 \cdot 10^{-5}$	Kg-m <sup>2</sup>
08.	Koefisien gesek	-	-

Jika dihitung, maka didapatkan rumus fungsi alih pada motor dc sbb:

$$T_M(s) = \frac{4000}{s^2 + 1167s + 4000} \quad (12)$$



Gambar 6. Rangkaian simulasi motor dc



Gambar 7. Tanggapan motor dc dengan input unit step

### Model Matematika DC drives

DC drives menggunakan SCR (*Silicon Cotrolled Rectifier*) yang berfungsi sebagai *actuator* kendali dan mengkonversi sinyal ac dari sumber menjadi sinyal dc untuk catu daya jangkar motor dc.

Tabel 3. Data dc drives

No	Variable	Nilai	Satuan
1.	Vdc	180	Volt
2.	Vm	220	Volt

$$K_{SCR} = \frac{180}{220} = 0.82$$

$$t_{SCR} = 4ms \text{ [5]}$$

Model matematika *dc drives* dapat didekati dengan sistem orde satu, tetapi karena respon dinamik dc drives adalah jauh lebih cepat dibandingkan dengan respon proses, maka konstanta waktu (*time constant*) dan *death time* pada *dc drives* dapat diabaikan. Sehingga fungsi alih *dc drives* dapat didekati dengan penguatan (*gain*) saja.

### Model Matematika Roda Gigi

#### 1. Hubungan Roda Gigi Yang Bersinggungan

Dalam selang waktu yang sama, panjang lintasan yang ditempuh kedua roda adalah sama, maka laju linier kedua roda juga sama, tetapi arah putarannya berlawanan.

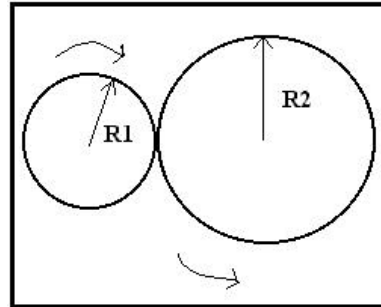
$$v_1 = v_2$$

$$\omega R_1 = \omega_2 R_2 \quad (13)$$

Kecepatan putar roda gigi berbanding terbalik dengan banyaknya gigi. Roda yang besar selalu

memiliki gigi lebih banyak, sehingga kecepatan putarnya selalu lebih rendah.

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{n_1}{n_2} \quad (14)$$



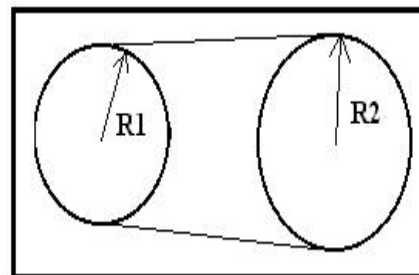
Gambar 8. Hubungan Roda-Roda Bersinggungan

#### 2. Hubungan Roda-Roda Yang Dihubungkan Dengan Sabuk (Rantai)

Untuk roda-roda yang dihubungkan sabuk, laju liniernya sama.

$$v_1 = v_2$$

$$\omega R_1 = \omega_2 R_2 \quad (15)$$



Gambar 9. Hubungan roda dengan sabuk (rantai)

Pada dasarnya *reducer* dan *sprolet* merupakan sistem transmisi daya, yang terdiri dari roda gigi dengan susunan tertentu, yang berfungsi mentransfer putaran dari poros motor dc menuju *belt conveyor*.

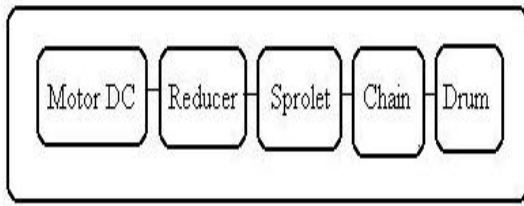
Tabel 4 Data reducer dan sprolet

No	Besaran fisik	Harga
01.	Rasio reducer	1/59
02.	Rasio sprolet	1/23
03.	Chain	1/70

Tabel 5. Data belt conveyor & drum

No	Besaran fisik	nilai	Sat.
01.	Panjang belt	6	m
02.	Lebar belt	30	inch
03.	Diameter drum	20 & 17	inch





Gambar 10. Sistem transmisi daya pada *weight feeder*

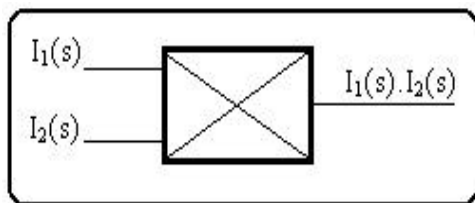
Sehingga pada akhirnya diperoleh besarnya gain untuk sistem transmisi sebagai berikut:

$$K_T(s) = \frac{1}{59} * \frac{23}{70} * 20 = 0,111$$

### Model Matematika Unit Pengali (*Multiplier*)

Rangkaian pengali (*multiplier*) merupakan unit pengali yang tegangan keluarannya sebanding dengan perkalian input masukan:

$$G_M(s) = I_1(s) \cdot I_2(s)$$



Gambar 11. Unit pengali (*multiplier unit*)

### Hubungan Matematika Antara Berat Dengan Kecepatan

Secara matematis hubungan berat material yang melalui belt conveyor dengan laju linier jalannya *belt conveyor* dapat didekati dengan persamaan differensial sebagai berikut :

$$\begin{aligned} v &= \frac{1}{c} \frac{dw}{dt} \\ w &= K \int v \cdot dt \\ w(s) &= \frac{K_{wv}}{s} \cdot v(s) \\ \frac{w(s)}{v(s)} &= \frac{K_{wv}}{s} \end{aligned} \quad (16)$$

W = berat material yang diumpankan ke proses (MTPH).

v = kecepatan linier belt conveyor (FPM)

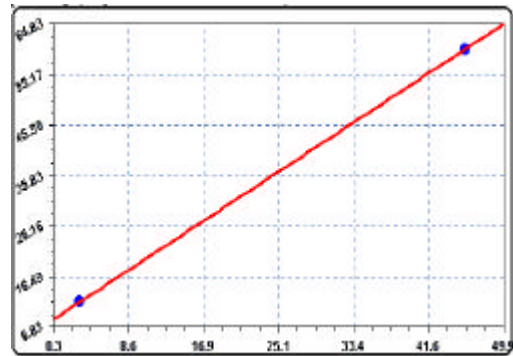
Tabel 6. Data hubungan berat dengan kecepatan

No.	Output berat (MTPH)	Kecepatan (FPM)
01.	60	45,67
02.	11,66	3,22

*Coefficient Data :*

$$a = 7.9932203$$

$$b = 1.1387515$$



Gambar 12. Hubungan antara berat dan kecepatan

*Linear Fit:*  $y = a + bx$

Tabel 7. Data belt conveyor dan drum

No	Besaran fisik	nilai	Satuan
01.	Panjang belt	6	m
02.	Keliling drum	149	cm
03.	Design speed	40,2	Feed/m

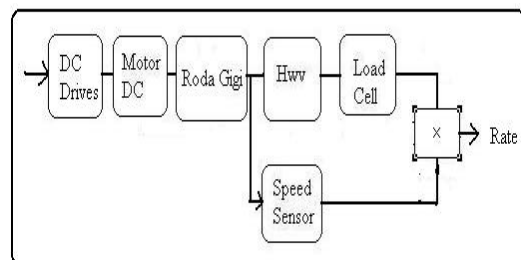
Dari data hubungan antara berat dan kecepatan, maka dapat dihitung nilai penguatan  $K_{wv}$  sebagai berikut :

$$\frac{W(s)}{V(s)} = K_{wv} = 1.138$$

Sehingga hubungan berat dengan kecepatan dapat didekati dengan persamaan berikut:

$$\frac{W(s)}{v(s)} = \frac{1,138}{s} \quad (17)$$

### Model Matematika Loop Terbuka Plant



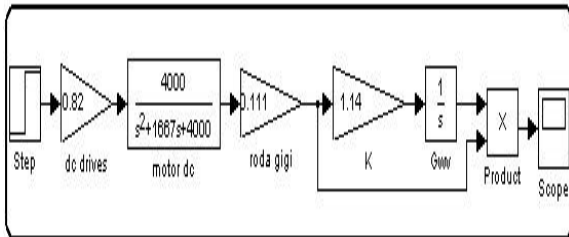
Gambar 13. Diagram kotak model loop terbuka *weight feeder*

## 1. Fungsi Alih Loop Terbuka

Setelah dilakukan perhitungan, diperoleh fungsi alih loop terbuka plant dengan hasil sebagai berikut :

$$T(s) = \frac{137}{s(s^2 + 1667s + 4000)}$$

$$T(s) = \frac{137}{s^3 + 1667s^2 + 4000s} \quad (18)$$



Gambar 14. Rangkaian simulasi fungsi alih loop terbuka

## 2. Penyajian Sistem ke Dalam Bentuk Persamaan Keadaan (*state space equation*)

$$\left[ \frac{dx}{dt} \right] = A[x] + B[u] \quad (19)$$

$$[y] = C[x] + D[u]$$

Berdasar perhitungan dengan menggunakan program bantu MATLAB diperoleh hasil konversi dari fungsi alih (*transfer function*) ke persamaan keadaan (*state space*) dengan hasil sebagai berikut: [4]

- Matriks keadaan (*state*) sistem:

$$A = \begin{bmatrix} -1667 & -4000 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

- Matriks keluaran sistem:

$$C = [0 \quad 0 \quad 137] \quad D = [0]$$

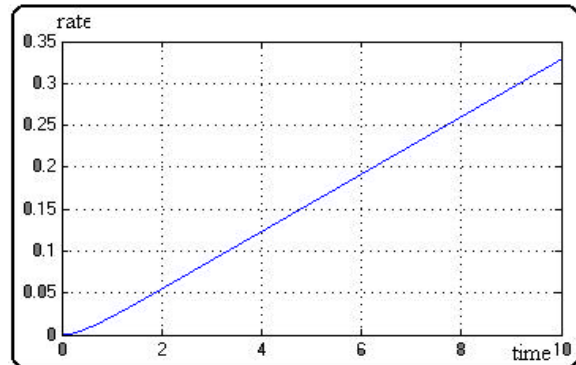
- Lokasi pole-pole:  $P_1 = -1664,6$

$$P_2 = -2,403 \quad P_3 = -0$$

## Simulasi Model Plant

Setelah dilakukan pemodelan terhadap plant (*weight feeder*), maka langkah selanjutnya akan dilakukan proses simulasi. Sistem diberi input dengan sinyal uji step, kemudian diamati tanggapannya. Tanggapan sistem yang dimaksud

adalah tanggapan peralihan (*transien*) dan tanggapan keadaan mantap (*steady state*)



Gambar 15. Respon loop terbuka pada *weight feeder*

## Kesimpulan

Dari gambar terlihat bahwa respon loop terbuka plant meningkat bersamaan dengan waktu. Hal tersebut terjadi karena pada plant mempunyai lokasi pole di titik asal, sehingga plant bersifat sebagai integrator. Secara praktik hal tersebut ditandai dengan penumpukan berat (material) yang keluar dari *weight feeder*. Karenanya plant membutuhkan suatu rangkaian controller yang dapat memperbaiki respon plant menuju suatu kondisi yang diinginkan, sekaligus mengkompensasi berbagai gangguan (*distrurbance*) pada proses.

## Daftar Pustaka

- [1] Ogata K., *Modern Control Engineering*, Prentice Hall International, Inc. 1996.
- [2] PT Semen Gresik (Persero), Tbk., *P&ID Clinker Silo Storage & Grinding: Clinker & Storage Silos*, area 41 no. gambar: 41-55-2002.
- [3] The HK. Ferguson Company, *Manual Instruction-Model 460 Weightometer and DSC-1 Digital Feed Control System*, 1977.
- [4] Gopal M., *Control System Engineering*, Wiley Eastern Limited, New Delhi. 1982.
- [5] Leonhard W., *Control of Electrical Drives*, Springer-Verlag, Berlin Heiderberg. New York Tokyo. 1985.
- [6] PT Semen Gresik (Persero), Tbk., Direktorat Teknik & Perekayasaan, *Plant Flow Sheet*, no gambar: TP-000-X
- [7] Shearer, J. Lowen., *Dynamic Modeling and Control of Engineering Systems*, Macmillan Publishing Company, New York. 1990.

- [8] Shahian Bahram, Hassul Michael, Control Sistem Design Using Matlab., Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 1993.
- [9] Ogata K., Solving Control Engineering Problems with MATLAB, Prentice Hall International, Inc. 1994.
- [10] PT Semen Gresik (Persero), Tbk., Diagram Proses Finish Mill Area II-41 Gresik.